

# 综合地球物理方法在山东百里店地区 找寻隐伏金矿中的应用<sup>\*</sup>

郝天珧 江为为

(中国科学院地球物理研究所, 北京 100101)

## 摘 要

在综合地质、地球物理研究所取得规律性认识的指导下,对在百里店地区进行的一次寻找隐伏矿床的勘探成果进行了分析.这是在对全国宏观研究、区域研究的基础上,分层次地筛选出有利于成矿的地区.在该地区综合地球物理勘探工作采用高精度磁力、微重力、激发极化及CSAMT方法,并与地质、地球化学资料相结合,以提高反演结果的可靠性.还对百里店地区寻找隐伏矿床的实例进行了详细的讨论,给出了大量实验室数据与物性测量结果,建立了百里店地区低磁、高密度、高极化率、低电阻率的综合地球物理找矿模式,同时给出了研究与预测结果.

**关键词** 综合地球物理方法, 隐伏矿床, 百里店.

## 1 引 言

在地质找矿实践中,已经认识到进行分层次研究的必要,从而有普查、详查和勘探阶段的划分.但对于地球物理方法而言,在控制矿产分布的深部地质环境分析方面很少应用,特别是对矿产区的宏观预测方面更未充分发挥作用.为了充分发挥地球物理信息在找矿各个阶段的作用,刘光鼎在1995年提出了三个层次的地球物理勘探活动<sup>[1]</sup>,即全国战略展开、区域战役普查和矿区战术勘查.

全国地球物理战略展开即在全国性遥感及重、磁资料分析的基础上,以GGT断面为骨架,研究深部结构、断裂体系、岩浆活动及与矿产分布的关系.提交1:100万—1:500万全国地球物理矿产预测图.刘光鼎根据本项研究已提出“三横、两竖和两个三角”的全国宏观构造格架<sup>[2]</sup>,并指出在块体结合带上是寻找内生金属矿的重点地区.

区域地球物理战役普查是指在全国矿产地球物理预测的基础上,选择华北地台北缘和胶东两个有利形成隐伏大矿的地区进行1:20万—1:50万的区域性地球物理综合研究.并对这些地区进行地球物理预测.

矿区地球物理战术勘查是在区域地球物理预测的成矿远景区,根据地球物理场特征显示已具备形成隐伏大矿的地质条件、而且地表及浅层已有小型矿发现的原则,选择山东百里店地区,采用高精度重、磁、CSAMT及激发极化等方法进行了矿区综合地球物理研究.该研究区面积为0.4 km<sup>2</sup>.

<sup>\*</sup> 国家攀登计划资助项目(B85-34).

本文1997年6月16日收到,1998年4月28日收到修改稿.

地球物理测量能够获取地下地质体的大量信息,但也面临反演问题解的非唯一性问题.针对这一情况,刘光鼎在 1992 年提出了综合地球物理的概念.这是在板块构造理论指导下建立起来的一套地球物理探测与解释系统,综合应用多种地球物理勘探手段,根据各自的勘探能力分不同层次进行.在解释系统中,应用计算机人机联作及可视化技术,对采集的各种数据进行联合反演.采取地质、地球物理与地球化学资料相结合、正演与反演相结合、定性解释与定量解释相结合,经过多次反馈,使其逼近于客观真实情况.为找矿勘探提供宏观地质背景或局部地下三维地质结构.这个系统的工作流程如图 1 所示.

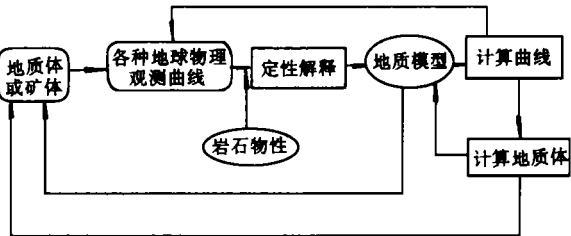


图 1 综合地球物理研究工作流程图

山东省栖霞百里店地区,是通过三个层次研究筛选出来进行综合地球物理研究的工作区.通过该区岩石物性研究和各种地球物理信息的综合解释,结合地质与地球化学资料分析,对百里店隐伏矿系进行了合理的推断分析与预测.

2 地质背景

百里店矿区大地构造位置位于胶北隆起的掖县—栖霞 EW 向构造带之上.其次一级

的大地构造单元为栖霞蓬莱隆凹,矿区处于整个胶东成矿带的中部.区内出露的地层主要为太古界胶东群齐山组角闪斜长片麻岩、变粒岩、斜长角闪岩及下元古界粉子山群的斜长角闪岩和黑云母变粒岩等.这些岩石大部分都经过了混合岩化作用,与金矿的关系密切.根据该区地层残片较大、较多的特征和有色金属及金矿建造分布特征分析,推测本区东西两侧地区的剥蚀深度在 1000m 以上,所以矿化垂直深度大,有可能赋存为大型矿床.

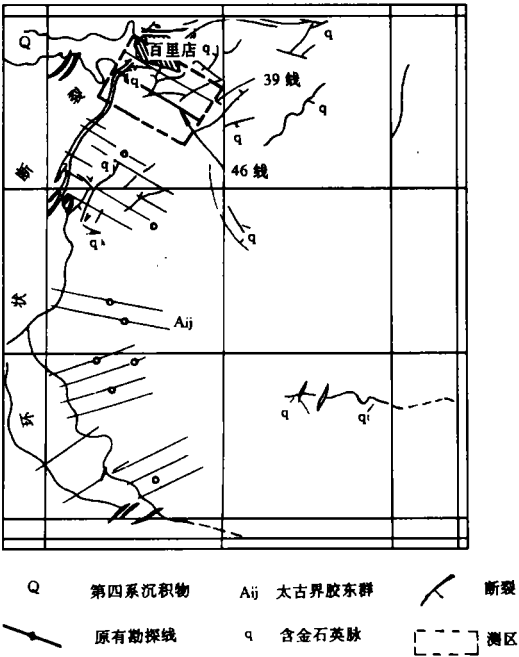


图 2 百里店及临近地区断裂构造分布示意图

百里店金矿在浅部属绿岩带含金石英脉型.矿区周边地区受一条半环状的断裂构造控制(图 2)<sup>[3]</sup>.环状构造在剖面上形成向 SEE 倾斜并散开的簸箕状.百里店金矿主要控矿断裂是总体走向 NE 的区域断裂,出露

长度 60 km. 该断裂产状变化大, 矿体主要分布在产状变化大的部位. 在 9 km<sup>2</sup> 的簸箕状区内有类似的数条断裂, 而且附近均有小型金矿存在. 因而通过百里店的金矿研究, 不仅可以了解地下三维地质结构、预测矿体的赋存状况, 还可以从点到面地推测整个地区的金矿远景.

百里店金矿的矿石中有多种伴生矿物, 除自然金银矿外, 还有黄铁矿、方铅矿、赤铁矿等硫化矿物及氧化矿物等 (见表 1)<sup>[4]</sup>. 当矿体中的金品位高时, 铅锌及银、铜、硫的品位也高.

表 1 百里店矿石中的矿物成分

类 别		主 要 矿 物	次 要 矿 物
金属 矿物	自然元素	银金矿 金银矿	
	硫化物	黄铁矿 方铅矿 闪锌矿	黄铜矿 磁黄铁矿
	氧化物		赤铁矿 磁铁矿
非金属 矿物	硅酸盐	石英 绢云母	黑云母 角闪石
		钾长石 斜长石	绿泥石 绿帘石 辉石
	碳酸盐	方解石 白云石	菱铁矿

3 微重力测量结果及解释

在测区内我们选择了 39 线和 46 线两条测线进行微重力测量. 观测精度在 10 微伽以内. 观测点距 25 m, 与其它物探方法进行同点观测. 每个测点均进行了水准高程测量, 并进行了各种改正.

为了对地下岩石密度状况有全面的了解, 在进行野外工作前进行了矿区各类岩石标本的密度及磁性参数测定, 10 块代表性标本的测量结果如表 2 所列.

表 2 主要岩矿标本磁性参数及密度测定结果

标本编号	岩 性	磁 化 率	磁化强度(A·m <sup>-1</sup> )	密度(g·cm <sup>-3</sup> )
1	混 合 岩	7×10 <sup>-6</sup>	9.86×10 <sup>-3</sup>	2.522
2A	含硫化物块状矿石	1.7×10 <sup>-6</sup>	3.57×10 <sup>-3</sup>	4.044
2B	含硫化物块状矿石	3.6×10 <sup>-6</sup>	2.48×10 <sup>-3</sup>	4.044
3	含矿石英脉	1.2×10 <sup>-6</sup>	2.18×10 <sup>-3</sup>	2.670
4	含矿石英脉	7×10 <sup>-6</sup>	1.67×10 <sup>-3</sup>	2.526
5	矿 体	-0.2×10 <sup>-6</sup>	4.54×10 <sup>-4</sup>	3.839
6A	闪长玢岩	32×10 <sup>-6</sup>	6.28×10 <sup>-3</sup>	2.751
6B	闪长玢岩	42×10 <sup>-6</sup>	1.54×10 <sup>-2</sup>	2.784
7	片 麻 岩	12×10 <sup>-6</sup>	6.84×10 <sup>-3</sup>	2.616
8	片 麻 岩	21×10 <sup>-6</sup>	3.52×10 <sup>-1</sup>	2.662

注: 密度测量与磁性参数测量是在中国科学院地球物理研究所高温高压实验室与古地磁实验室进行的.

测定结果表明,含矿岩石标本的密度明显大于围岩的密度,这是由于矿石中含有大量金属矿物而造成的.因此重力测量不仅可以用于圈定构造,重力异常还可作为隐伏金属矿床的找矿标志,与其它方法相互印证,为寻找隐伏矿体提供有用信息.经各项改正后的重力异常剖面图(图 3(a),图 4(a))上的重力曲线显示,研究区从南向北重力值逐渐加大,反映测区北部存在一个高重力异常.经解析延拓等方法处理后这个异常仍然存在,说明引起异常的地质体埋深较大.同时,还在研究区的中偏北部(-75 至 -100 点附近)发现了一组异常,与磁法和电法十分吻合.推测该处存在一条断裂.

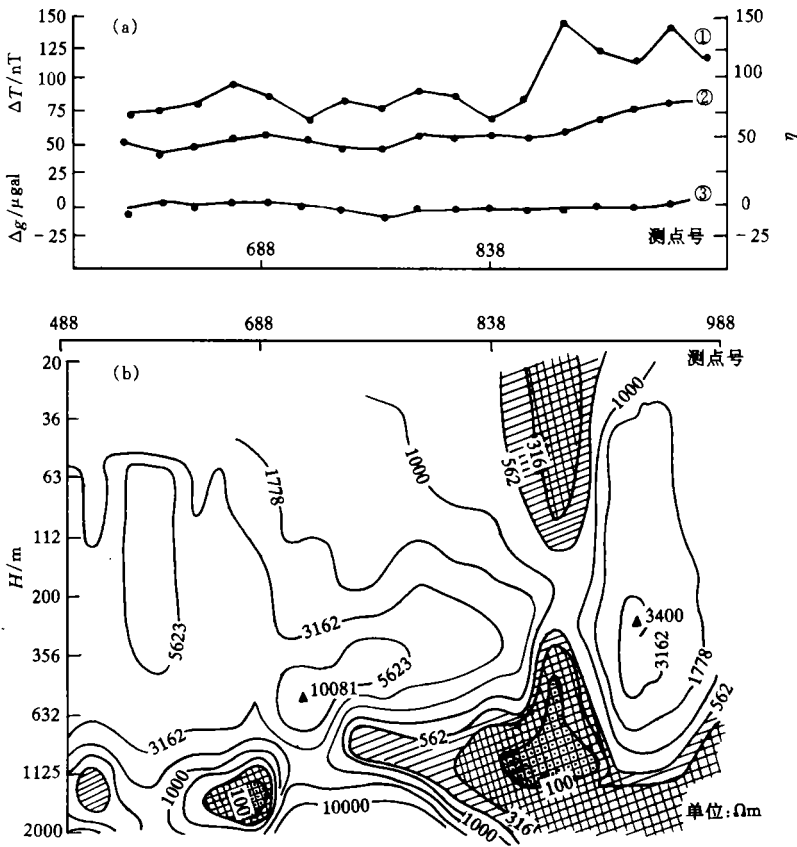


图 3 研究区 39 线 CSAMT 测深断面与重力、磁、激电剖面综合结果图  
(a) 重力、磁、极化率异常剖面; (b) CSAMT 测深断面.  
① 极化率异常( $\times 10$ ); ② 重力异常( $\times 1/10$ ); ③ 磁异常( $\times 1/10$ ).

4 高精度磁测数据结果及解释

百里店地区沿 315°NW 方向布设了 27 条高精度磁测测线,平均测线长度为 475 m,平均线距为 25 m,点距为 25 m.经日变改正后异常数据有很好的 consistency.同时对各类矿区岩石进行了实验室磁化率测定(样品岩性及编号同密度测量),各样品磁性参数见表 2.

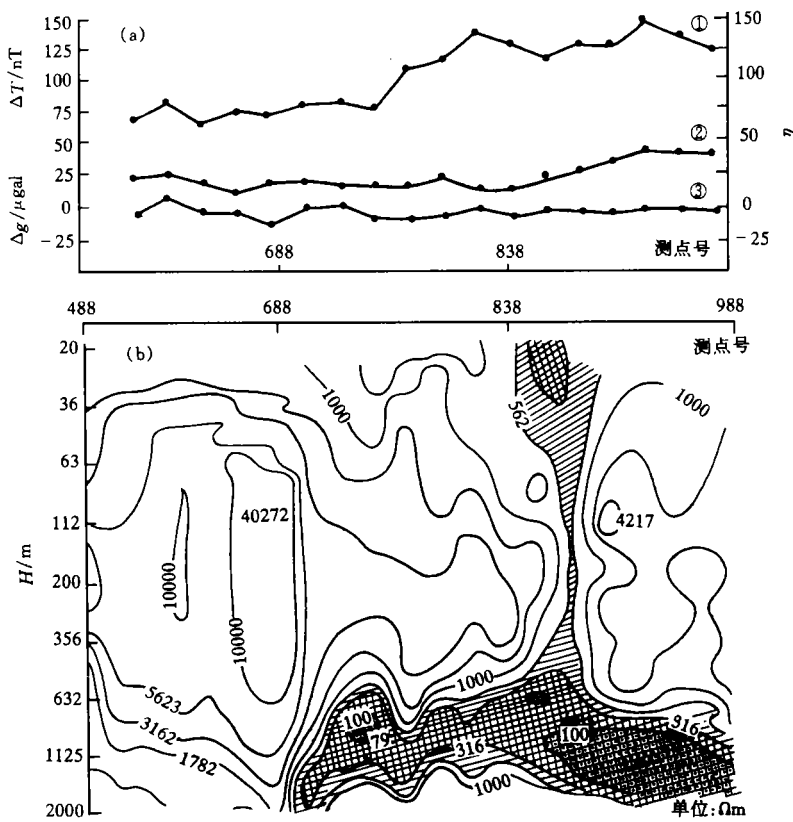


图 4 研究区 46 线 CSAMT 测深断面与重力、磁、激电剖面综合结果图

(a) 重力、磁、极化率异常剖面; (b) CSAMT 测深断面。

① 极化率异常( $\times 10$ ); ② 重力异常( $\times 1/10$ ); ③ 磁异常( $\times 1/10$ )。

测量结果表明,区内大量的黑云母片麻岩、斜长角闪岩等由于有大量铁镁矿物的存在而显示较强磁性。而矿区由于混合岩化、退化变质作用强烈,且大量的绢云母化、硅化及碳酸岩化热流蚀变集中在矿化较强的地段,致使岩石发生退磁,故低磁异常是矿化指示标志。

从研究区的磁异常图(图 5)上可以看出,研究区的中部圈出了一个低负磁异常区,而其边部为高值区。内有一系列高值异常沿 NE—NNE 方向呈串珠状分布,局部地段方向有扭曲。通过对磁测数据进行向上 25, 50 及 100m 的延拓处理,发现磁异常直至向上延拓 100m 处理图上才略有发散的现象。说明在一定的深度范围内,引起这个低负异常的地质体始终存在,因此该处应成为重点研究的地区。据此,对该区又进行了人机联作的重磁联合叠代反演,结合本区岩石物性特征分析,初步建立起本区地下的地质模型。根据重磁反演结果解释,我们推断在研究区的北部存在一个与矿化有关的低磁、高密度异常体。而中北部应有一条断裂存在。在进行了激电及 CSAMT 工作后,我们更确认这个推断是合理的,并根据电测深结果进一步修改了模型,最终各个模块的密度及磁化率参数情况参见图 6。

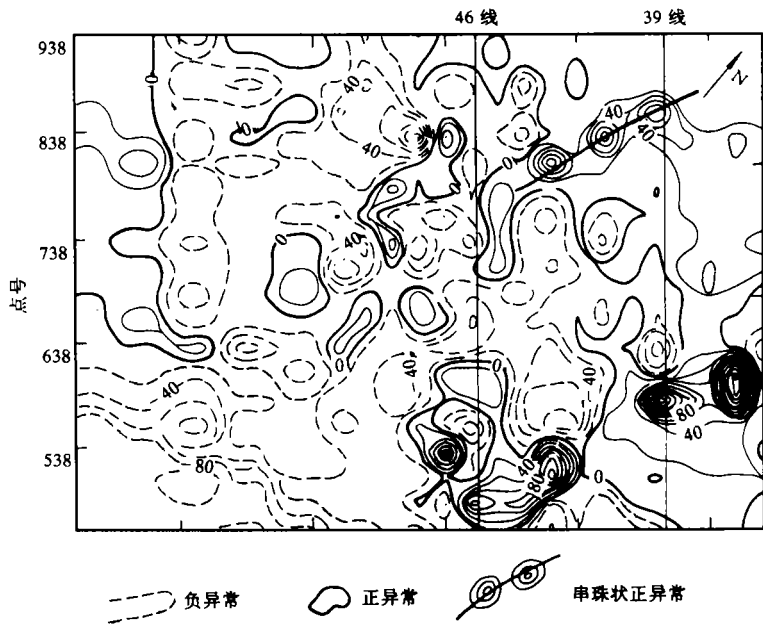


图 5 百里店地区高精度磁测结果平面图  
单位为 nT.

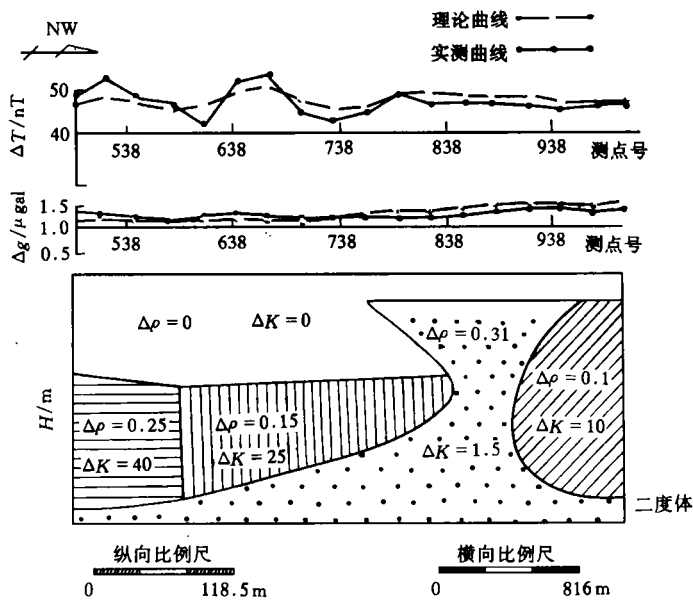


图 6 百里店地区重磁联合叠代反演结果  
 $\Delta\rho$  的单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

### 5 激发极化与 CSAMT 数据反演结果

根据磁法测量数据的解释结果,我们在 27 条测线上又进行了时间域激电测量.测点间距与磁法测量相同,发射机为 30kW 的 MG-30 和 T-30.激电测量采用中梯装置,AB 供电线长 1500m, MN=25m.首先采集了 42 块浅表矿体、围岩和岩脉标本,进行了岩石电性测量,测量结果见文献[5].

岩矿石电性测定结果表明,勘探的目的层呈明显的低阻高极化率,而围岩均为高阻低极化率.通过激电测量可以发现和确定浅层盲矿体及其延伸情况,电磁法测量可以圈出低阻高极化体深部的低阻带,二者相互补充.由此可见本研究区具备了用电法测量寻找深部隐伏盲矿体的前提.

图 7 是研究区的极化率结果平面图.图中反映出极化率从南向北逐渐升高,在北部显示出一条 NE 向的高极化区,最高可达 22.这个异常带 NE 长约 600m,宽约 170m,反映出地下有一条高极化体向 SE 倾斜并向纵深延伸.此外,研究区的中北部,有一条近 SN 向的极化率突变带,与磁测、重力异常推断解释相吻合,推测为断裂构造的反映.它应对测区内多金属硫化物金矿成矿具有一定的控制作用.

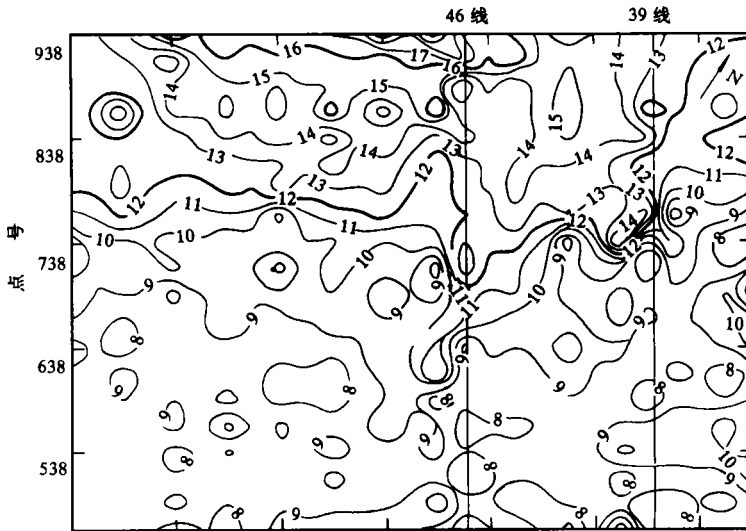


图 7 百里店地区时间域激电(极化率)实测结果平面图

根据激电测量结果,在 39 线和 46 线还进行了 CSAMT 测深断面测量.接收机为 V-4 系统,接收频率范围为  $2^{11}$ — $2^0$ Hz,收发距为 4km.点距为 25m,供电极距 AB 为 1000m.

从反演后的测深断面图(图 3(b)、图 4(b))中可以看出,两条测线在 863 号点附近存在着明显的低阻体.该低阻体位于测区的西北部,这与时间域激电、磁法及重力的测量结果是相吻合的.推断该处有一条 NE 向的断裂,该断裂构造可能为测区中一条重要的容矿、控矿构造.两条剖面均反映出在 863 号点处地下浅部(约 70m)和深部(约 700m)分别

有低阻异常存在,而且二者呈断续状相联.深部的一个低阻异常呈近层状向 SN 缓倾,浅部的一个较为狭窄,但向上向下分别通向地表和深部.浅部异常的位置恰好在测区的西北部,与激发极化异常十分吻合,应为测区内一条重要 NE 向的导矿、容矿构造的反映,而且在不同的位置还叠加有不同方向的构造.至于深部的低阻异常,推断为与浅部异常相连且同源的单斜容矿构造,倾向 SE.对于浅部异常前人已进行了浅钻,在 74m 处证实了矿体的存在.取样测试金的品位为 29g/t,而且金、银、铅、锌的含量均在 20% 左右.浅钻钻至 150—200m 时矿体消失,故停止钻探.但从 CSAMT 的反演图可以看出,这个异常与深部是断续相连的,如果钻探的深度加大到 700—800m 处,应可以再次发现矿体的存在<sup>[5]</sup>.

## 6 模糊逻辑计算结果

显然,从实验室标本测定结果和以上各图可以看出低磁化率、高极化率、高密度与矿化有着密切的对应关系.根据这一特点,我们将不同的物性情况分别赋予不同的权重,用模糊逻辑方法进行计算<sup>[6]</sup>.所用公式为

$$\mu_A(x) = \left[ \prod_{i=1}^m \mu_i(x) \right]^{1-\gamma} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^m [1 - \mu_i(x)] \right\}^{\gamma} \quad (x \in X, 0 \leq \gamma \leq 1), \quad (1)$$

其中  $X$  为研究目标的集合; $\mu_i(x)$  为相关函数,其取值区间为  $[0,1]$ , 0 表示不相关,1 表示完全相关; $m$  为数据种类数.在本次研究中  $m=3$ .相关函数分为四级,0.75 以上为最高.可以看出,研究区北部的高极化区也是本区中的矿化高富集区(0.65 以上),二者十分吻合.从另一个角度反映了北区的重要性.

## 7 综合分析及地质解释

各种地球物理方法测量的目的是将地质、地球物理和地球化学资料结合在一起对所有的有用信息进行综合解释.这些数据与资料是:(1)百里店地区地质资料及部分地球化学资料<sup>[3,4,7]</sup>;(2)岩石的各种物性参数资料;(3)根据地质与各种地球物理测量资料解释建立起的地质模型;(4)实测(同点观测)数据.分析结果表明,高矿化区(金属矿物高富集区)有相对低的电阻率和磁化率,并具有相对高的极化率和密度值.因此形成了矿体为高密度、高极化率、低电阻率、低磁化率的物性模型.浅部的低阻异常和含金矿脉的关系已为钻孔资料所证实,我们给出的物性模型也为本区的地球物理勘探建立了一个新的物性约束.以这个物性约束为基础,结合研究区的地质、地球物理及地球化学资料进行了综合分析.

研究区的中部为一个低负磁异常区,反映了与矿化有关的围岩蚀变(绢云母化、碳酸岩化等)特征,这是与矿化有关的目标区.上延处理后低磁异常仍然存在,表明引起异常的地质体主要应集中在深部.

磁异常区内存在着线性分布的异常带及梯度变化带,经野外调查,与蚀变的煌斑岩脉及闪长玢岩脉相对应.

在研究区北部的高极化区中开展的微重力测量表明,研究区中偏北部有一重力高异常处.经研究该异常处内岩石含金及多金属硫化物较多,因而显现高密度异常.电法测量



的结果,对研究区中北部的一条近 SN 向的断裂也有所反映,这与微重力测量及磁测结果是一致的.经地表追索和钻井资料证实,发现了一条断裂并确定了位置.

研究区的北部存在一个高极化区,极化率最高可达 22,异常带宽为 170 m,长 600 m,走向近 NE.此外,研究区 SE 方向有一个低值区,最低达 7,推测与一个向 SE 方向倾斜的容矿构造有关.

CSAMT 的两条剖面测量结果都证实了在 70 和 800 m 左右均有低阻异常的存在<sup>[5]</sup>.浅部的异常已为钻探证实与矿体有关,并且品位很高(平均金品位达 12 g/t).地质资料<sup>[4]</sup>证实本区深部存在低角度推覆构造,并认为是百里店地区周围约 9 km<sup>2</sup> 的环状断裂在深部的延伸.深部的异常呈缓倾斜的似层状,因此认为是与深部的推覆构造密切相关的.在研究区以外约 2 km 处的推覆构造的下盘地表露头上,村民们已发现了金含量为 1 g/t 蚀变岩型的矿化露头.如果深部异常与推覆构造有关,推覆构造上盘深部的低阻异常很有可能为蚀变岩型矿化所引起,这对于指导该区寻找较大规模的金矿将很有意义.根据以上分析,我们有理由认为在百里店矿区的西北部,除浅部存在小型矿体以外,在 700—800 m 的深部,有可能存在着较大的容矿构造及隐伏矿体,应该引起重视.

## 8 讨 论

栖霞百里店位于胶东隆起的次级构造单元的栖霞蓬莱隆凹中,与招远、牟平等地相比相对剥蚀较浅,少剥蚀约 1000 m<sup>[3]</sup>.而且两地金矿类型也不相同,招远以蚀变岩型矿著称,而栖霞地区则以石英脉型金矿为主.本次在百里店进行了一次地球物理探测尝试,尤其在证实了浅部异常确与金矿体有关,而且发现可能与隐伏矿体有关.由上述可知,从剖面上看,在 700—800 m 的深部存在着低电阻率异常,并与浅部金矿的低阻异常断续相连,因此推断深部存在着较大容矿构造或矿体的可能性.同时在百里店的外围已发现了推覆体的下盘岩石,其中有 1 g/t 的金含量.那么,可以推测在推覆构造的上盘岩块中,地下低阻异常很可能与蚀变岩型金矿有关.如果这一推测成立,在环状断裂围限的 9 km<sup>2</sup> 范围内,找矿将可能有较大的突破.

百里店地区地球物理的研究结果说明,只要观测方案设计合理、野外观测数据和分析软件可靠准确、模型设计与调试合理、有地质和地球化学资料的约束检验,综合地球物理研究方法在寻找隐伏金属矿、了解岩性分布、确定矿体的产状和形态等方面可以发挥较好的作用.本次工作只选用了高精度磁力、微重力、激电和 CSAMT 方法,如果需要,还可以增加地震及电阻率层析成像方法<sup>[8]</sup>以加强效果.应说明的是,对矿区进行大比例尺地球物理勘探是在全国与区域矿产地球物理预测的基础上进行的,这样才能获得全面的认识并得到较为理想的结果.

**致谢** 本文的工作是在刘光鼎院士的设计和指导下完成的.百里店地区的工作也是在其亲自设计指导下完成的,山东省地质矿产局的张志敏高级工程师、烟台市黄金工业局岳书义高级工程师也给予了大力支持,参加本项工作的还有于昌明、李英贤、焦承民、张庚利、李平等同志,中国科学院地质研究所的刘秉光研究员给予了地质解释方面的指导,在此一并致谢.

参 考 文 献

- 1 刘光鼎,郝天珧.应用地球物理方法寻找隐伏矿床.地球物理学报,1995,38(6):850—854
- 2 刘光鼎,郝天珧,刘伊克.中国大地构造宏观格架及与矿产资源的关系.科学通报,1997,42(2):113—118
- 3 迟纪洪.山东栖霞地区金、银及有色金属矿床成矿规律的初步认识.地质与勘探,1993,29(1):1—6
- 4 张志敏.山东省栖霞县百里店铅锌金矿田普查报告.济南:山东省地质矿产局,1990
- 5 于昌明.CSAMT方法在寻找隐伏金矿中的应用.地球物理学报,1998,41(1):133—138
- 6 江为为.模糊逻辑理论在矿区勘探与解释中的应用.地球物理进展,1998,13(1):115—119
- 7 邓 军,徐守礼,方 云等.胶东西北部构造体系及金成矿动力学.北京:地质出版社,1996
- 8 赵永贵,王超凡,陈燕民等.地震CT在寻找隐伏铜镍矿中的应用.地球物理学报,1996,39(2):273—279

APPLICATION OF COMPREHENSIVE GEOPHYSICAL  
METHODS IN LOOKING FOR HIDDEN GOLD  
MINE IN BAILIDIAN REGION

HAO TIAN-YAO JIANG WEI-WEI

(Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract

Under the guidance of regular knowledge from comprehensive geology and geophysics research, a comprehensive prospecting action is carried out in Bailidian region for looking for gold deposition. Bailidian region is chosen on the base of macroscopic and overall geophysics cognition of whole China. The comprehensive prospecting including microgravity, magnetic method, induced polarization and CSAMT methods are carried out according to the regional geology background and geochemical information. Some physical feature data of rocks in mine field are shown in this paper. The comprehensive geophysics model of looking for mine is set up according to the characteristic of “low magnetic susceptibility–high density–high polarizability–low resistivity” in this region. The result of geophysical analysis and prospecting are discussed in this paper, too.

**Key words** Comprehensive geophysics method, Hidden deposition, Bailidian.

**作者简介** 郝天珧,女,1957年出生,1982年毕业于长春地质学院地质系,现为中国科学院地球物理研究所副研究员.主要从事沉积盆地地球物理、海洋地球物理及金属矿地球物理研究.